

PO 03 / 00106
BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Rec'd PCT/PTO 15 JUL 2004



REC'D 13 MAR 2003
WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 04 879.7

Anmeldetag: 19. Januar 2002

Anmelder/Inhaber: Prof. Dr. Klaas Bergmann, Kaiserslautern/DE;
Spheron VR AG, Kaiserslautern/DE.

Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung

IPC: G 01 S 7/48

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 27. Februar 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

BEST AVAILABLE COPY

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Lasersystems mit dessen Hilfe die Güte berührungsloser Entfernungsmessungen ganz wesentlich verbessert werden kann.

Die zugrunde liegenden Prinzipien sind sowohl durch theoretische- als auch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen. Die dabei im Forschungskontext eingesetzten Systeme (Laser mit frequenz-verschobener Rückkopplung, „FVR-Laser“) sind jedoch für die praktische Anwendung in einem industriellen Umfeld ungeeignet.

Werden die bislang erzielten Ergebnisse jedoch in eine kompakte, und für die Anwendung optimierte Einheit überführt, so könnte ein solches Lasersystem den bekannten Stand der Längenmesstechnik in mehreren Bereichen bei weitem übertreffen und deshalb als Basistechnologie in einer Vielzahl von wirtschaftlich hochgradig attraktiven Anwendungen zum Einsatz kommen.

So wird z.B. die Kombination aus dieser neuen Form der Entfernungsmessung mit einem digitalen photographischen System zu erstaunlich verbesserten Techniken für die dreidimensionale Objekt-Erkennung und -Vermessung führen.

Erste sich aus den erkannten neuen Möglichkeiten ergebende technologische Konzepte sind bereits durch patentrechtliche Anstrengungen (der kooperierenden Firma SpheronVR, Kaiserslautern) abgesichert. Auch der weiter unten dargestellte neue Ansatz zur Nutzung eines FVR-Lasers für Entfernungsmessungen mit noch höherer räumlicher Auflösung wird ebenfalls durch einen Patentantrag (gestellt über die Universität Kaiserslautern) geschützt werden können.

Prof. A. Tünnermann, FSU Jena, führend auf dem Gebiet der Faserlaser tätig, hat Beratung und Unterstützung bei der Entwicklung des Faserlasers zugesagt (siehe beiliegendes Schreiben).

1.2 Wissenschaftliche Grundlagen

1.2.1 Hintergrund

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur berührungslosen Entfernungsmessung. Laserverfahren haben den Vorteil, dass sie sehr flexibel und auch über größere Entfernungen zwischen Messstation und Objekt eingesetzt werden können. Die meisten Anwendungen finden bei Entfernungen im Bereich zwischen 0.1 und 100 m statt. Die Maßverkörperung geschieht dabei entweder durch die Bestimmung der Laufzeit des Lichtes – vergleichbar dem Radar – oder durch die Vermessung und Analyse der relativen Phasenlagen in einem Interferometer (Zweifrequenzlaser).

Radar-ähnliche Verfahren schließen z.B. aus der Laufzeit von Laserpulsen zwischen Messkopf und Objekt auf die Entfernung. Hohe räumliche Auflösung erfordert kurze Laserpulse. Licht legt in einer Zeit von 3 fs eine Strecke von ca. 1 μm zurück. Um

eine Auflösung von etwa $10 \mu\text{m}$ zu erreichen, sind daher Laserpulse von ca. 10 fs erforderlich. Die Erzeugung solcher Pulse ist aufwändig. Vor allem führt die große Bandbreite dieser kurzen Pulse zu einer schnellen Pulsverbreiterung beim Durchgang durch Luft. Für viele Aufgabenstellungen sind daher Verfahren, die auf fs-Pulsen beruhen, nicht geeignet.

Das hier vorgesehene Verfahren beruht auf einem Laser mit Frequenz-verschobener Rückkopplung (FVR-Laser) [1-4]. Die Entwicklung eines solchen Lasers für die Erzeugung ultrakurzer Laserpulse war Gegenstand eines früheren, von der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation geförderten, Projektes (8031-386261/245). Zuvor waren FVR-Laser in der Gruppe des Antragstellers ausführlich und für verschiedene Verstärkungsmedien untersucht worden. Zu den untersuchten Verstärkungsmedien gehörten Laserfarbstoffe [2], Laserdioden [3], Titan-Saphir [4] sowie Nd:YAG und Nd:YVO₄ [5]. Die Eigenschaften der FVR-Laser sind für die unterschiedlichen Medien (Farbstoffe, Halbleiter, Festkörper) sehr verschieden. Die Untersuchungen umfassten Experimente und theoretisch-numerische Arbeiten [4].

Nakamura et. al. haben die Arbeiten aus Kaiserslautern aufgegriffen und mit einem FVR-Festkörperlaser (Nd:YVO₄) gezeigt, dass FVR-Laser zur Entfernungsmessung eingesetzt werden können [6]. Parallel dazu wurden entsprechende Experimente in Kaiserslautern gemacht [7]. Über andere interessante Anwendungen eines FVR-Lasers wurde bereits früher berichtet [9 - 11].

Das Bemühen, die physikalischen Grundlagen eines FVR-Lasers – die bisher in der Literatur noch nicht vollständig dargestellt worden sind – besser zu verstehen [8], führte auf weitergehende Einblicke in die Physik von FVR-Lasern. Diese neuen Einblicke sind Grundlage dieses Projektantrages.

1.2.2 Entfernungsmessung mit frequenzvariabler Laserstrahlung

Die Grundidee, auf welcher alle bisherigen Konzepte zum Einsatz frequenzvariabler Strahlung für Entfernungsmessungen beruhen, ist sehr einfach. Ein Laserstrahl, dem ein linearer chirp aufgeprägt ist (siehe Bild 1), wird in einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgespalten, die von der Mess- bzw. einer Referenzfläche reflektiert und auf einem Strahlungsdetektor wieder überlagert werden (Bild 2). Da die beiden Strahlen unterschiedliche Wege zurücklegten, haben sie beim Auftreffen auf den Detektor unterschiedliche Frequenz, $v(t)$ und $v(t + \Delta t)$. Der Detektor ist in der Lage, die Schwebungsfrequenz $\Delta v = |v(t) - v(t + \Delta t)|$ zu messen. Wenn die Frequenz sich linear mit der Zeit ändert, $v(t) = v_0 + \alpha t$, ist der Zusammenhang zwischen der Schwebungsfrequenz und dem Unterschied ΔL der Laufwege von Referenz- und Messstrahl gegeben durch $\Delta v = \alpha \Delta L/c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Die Entfernungsmessung wird also auf eine Frequenzmessung transformiert, wobei – in diesem Messansatz – die Genauigkeit allein durch die Genauigkeit von α während der Messdauer bestimmt wird.

Dieser einfache Zusammenhang zeigt auch, dass die Größe der Schwebungsfrequenz Δv durch geeignete Wahl des Aufbaus in einen Frequenzbereich verlagert werden kann, der sehr günstig für den elektronischen Nachweis ist. Weiterhin wird klar, dass

4
die Empfindlichkeit der Messgröße Δv auf Änderungen der zu messenden Größe ΔL proportional zum *chirp* α (Frequenzänderung pro Sekunde) ist. Somit können Auflösung, Messintervall und Messdauer durch die Wahl von α in eleganter Weise den bestehenden Anforderungen angepasst werden.

Eine einfache Abschätzung zeigt, dass bei einer Wegdifferenz $\Delta L = 1 \mu\text{m}$ eine Schwebungsfrequenz von 10 kHz erreicht wird, wenn die *chirp*-Rate $\alpha = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ 1/s}^2$ beträgt. Dies ist ein sehr hoher Wert. Wie unter 1.2.3 erläutert wird, gelingt es mit einem FVR-Laser in ausgezeichneter Weise ein solches Strahlungsfeld mit streng linearem *chirp* α zu erzeugen. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der Bestimmung der Schwebungsfrequenz zwischen Referenz- und Objektstrahl von Bedeutung. Der bisherige Ansatz - der auch von anderen Forschergruppen aufgegriffen wurde - kann letzteres nicht mit hinreichender Güte erreichen.

1.2.3 Entfernungsmessung mit einem FVR-Laser nach *bisherigem* Ansatz

Die frühere, auch von anderen Forschergruppen umgesetzte Idee geht von einer bestimmten Vorstellung über die zeitliche Variation des Spektrums des FVR-Laser aus (Bild 3, FVR-Laser). In der Tat war diese Vorstellung ausreichend, um erste Machbarkeitsstudien durchzuführen [6,7]. Weitergehende Überlegungen (siehe 1.2.4) zeigen jedoch, dass die auf diesen früheren Vorstellungen aufbauenden Experimente die Schwebungsfrequenz zwischen Objekt- und Referenzstrahl viel zu ungenau bestimmen und die prinzipiell möglichen Auflösungsgrenzen weder analysieren oder verstehen noch erreichen.

Die Frequenz des im Resonator zirkulierenden Lichtfeldes wird bei jedem Umlauf um einen Betrag verschoben, der durch die Frequenz der akustischen Welle im AOM (akusto-optischer Modulator) gegeben ist. Die theoretische Beschreibung und die experimentelle Charakterisierung des ausgekoppelten Strahlungsfeldes ist dabei nicht trivial. Ein Modell geht von der Vorstellung aus, dass der FVR-Laser einem regenerativen Verstärker ähnlich ist. Die *seed*-Strahlung wird durch spontane Emission zur Verfügung gestellt. Diese *seed*-Strahlung wird verstärkt und in der Frequenz durch den AOM verschoben. Obwohl durch spontane Emission innerhalb der Verstärkungsbandbreite jede Frequenz verstärkt wird und daher im Ausgangsspektrum vorhanden ist, zeigen die Beobachtungen (Bild 4, Entwicklung der Frequenz als Funktion der Zeit), dass das vom FVR-Laser emittierte Spektrum auch aus einem Modenkamm besteht, dessen Elemente im Abstand des freien Spektralbereiches des Resonators positioniert sind. Die Frequenz jeder dieser Komponenten verändert sich in exakt gleicher Weise linear mit der Zeit und erzeugt so den Anteil des Gesamtspektrums mit konstantem *chirp* α .

Der *chirp* ist dabei gegeben durch die AOM induzierte Frequenzänderung Δv_{AOM} pro Umlaufzeit τ_R im Resonator, also $\alpha = \Delta v_{\text{AOM}}/\tau_R$. Der Frequenzunterschied der Elemente des Frequenzkammes ist Δv_{AOM} . Die genaue Positionierung des Frequenzkammes innerhalb des Verstärkungsprofils bzw. der Emissionsbandbreite zu einem Zeitpunkt t_0 stellt sich zufällig ein und stabilisiert sich dann in dieser Position durch nicht-lineare optische Prozesse (z.B. durch Vier-Wellen-Mischung) im Verstärkungsmedium. Die Annahme, dass es sich um einen streng linearen *chirp* handelt, ist zwar von entscheidender Bedeutung für die geplante Anwendung, bleibt in diesem Modell aber unbegründet.

5
Die Messidee geht davon aus, dass das Spektrum eines FVR-Lasers für präzise Entfernungsmessungen nach dem unter 1.2.2 beschriebenen Grundgedanken besonders gut geeignet ist, da es sich durch sehr schnellen und streng linearen *chirp* auszeichnet. Die Tatsache, dass nicht nur eine einzelne Frequenzkomponente angeboten wird, sondern ein Frequenz-Kamm, erscheint in diesem Modell unschädlich, da jede einzelne Komponente zu der gleichen Schwebungsfrequenz der Größe $\Delta v = \alpha \Delta L/c$ beiträgt. Die Schwebungsfrequenzen, die durch Überlagerung verschiedener Komponenten des Frequenzkammes verursacht werden, liegen bei

$$\Delta v = \alpha \Delta L/c + n v_{AOM}. \quad (1)$$

Der zweite Term ist in der Regel größer als der erste (in dem die Information über ΔL steckt), so dass die unterschiedlichen Beiträge zum Spektrum der Schwebungsfrequenzen eindeutig den einzelnen Komponenten zugeordnet werden können.

Eigene Messungen mit einer Interferometer-Anordnung (analog zu Bild 2) nach diesem Verfahren sind in Bild 5 gezeigt. Dargestellt ist die Intensität der RF-Frequenzkomponenten als Funktion des Größe ΔL , die extern variiert wurde. Man erkennt zwei Komponenten des RF-Spektrums, die nicht von ΔL abhängen. Eine davon entspricht der Frequenz $v_1 = 2 v_{AOM}$. Diese Komponente entsteht durch eine Intensitätsmodulation, die durch einen Stehwellen-Anteil im AOM verursacht wird. Ein kleiner Teil der für die Frequenzverschiebung verantwortlichen laufenden akustischen Welle wird an der Rückseite des Modulators reflektiert und führt zu einem Stehwellen-Anteil im AOM, welcher zu einer mit $2 v_{AOM}$ periodischen Modulation der Beugungseffizienz führt. Die andere Komponente entspricht dem Inversen der Resonatorumlaufzeit, also dem longitudinalen Modenabstand. Diese Komponente wird durch Fluktuationen verursacht. Sobald eine kurzzeitige Schwankung induziert wird, wiederholt sich diese nach einer Umlaufzeit. Im RF-Spektrum zeigt sich daher eine entsprechende Frequenzkomponente.

Die dritte, spektral relativ breite, Frequenzkomponente verändert sich linear mit ΔL . Diese Komponente zeigt den nach (1) erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Δv und ΔL für $n = 0$. Wenn man davon ausgeht, dass sich die Zentralfrequenz dieser etwa 200 kHz breiten Struktur auf 2 kHz genau bestimmen lässt, kann ΔL auf etwa 0.5 mm genau ermittelt werden. Die physikalische Ursache für die Breite der Struktur bleibt zunächst ungeklärt. An dieser Stelle setzen die neuen Überlegungen an.

1.2.4 Entfernungsmessung mit einem FVR-Laser nach neuem Ansatz

Die nachfolgenden Überlegungen zeigen, wie das oben vom Grundsatz her beschriebene Verfahren mit wesentlich höherer räumlicher Auflösung umgesetzt werden kann. Das aus diesen Überlegungen resultierende Konzept ist patentfähig. Ein Patentantrag wird zur Zeit angestrengt. Die Überlegungen und vorläufigen Ergebnisse werden daher hier mit dem ausdrücklichen Hinweis auf die Notwendigkeit zur strengen Vertraulichkeit dargestellt.

Eine genaue Analyse der physikalischen Grundlagen und die Überlegungen, welche zu Gleichung (1) führen, zeigt [8], dass das unter 1.2.3. vorgestellte Modell nicht korrekt, zumindest in wesentlichen Aspekten unvollständig, ist. Dem in Bild 4

6

dargestellten Spektrum (Frequenzkamm "mit zeitlich" gleichmäßiger linearer Veränderung der Frequenz der einzelnen Komponenten) kann ein anderes Bild gegenübergestellt werden (Bild 6, Intensität der einzelnen Frequenzkomponenten). Ein spontan emittiertes Photon wird bei jedem Umlauf im Resonator im Verstärkungsmedium vervielfacht und durch den AOM in der Frequenz verschoben. Man erwartet also über der Frequenzskala einen stationären Modenkamm. Eine zeitlich lineare Veränderung der Frequenz ist nicht erkennbar. Da der AOM höchstens vernachlässigbar kleine Phasenfluktuationen einbringt, bestehen feste Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Komponenten. Ohne weitere Einflüsse von außen, führen die spontan emittierten Photonen zu einer Vielzahl solcher Modenkämme, die sich in der Summe zu einem „dichten“ Spektrum überlagern können.

Ein einzelner Modenkamm dominiert das Spektrum, wenn spektral schmalbandige Strahlung in den Resonator injiziert wird. Es kann gezeigt werden [8], dass unter diesen Bedingungen (*injection seeding*) die in Bild 6 und Bild 4 gezeigten Spektren äquivalent sind. Es kann jedoch auch gezeigt werden, dass die aus Bild 4 abgeleitete Vorstellung über das Zustandekommen eines Schwebungsspektrums (1) *nicht* korrekt ist. Die Kohärenz zwischen den einzelnen Frequenzkomponenten führt dazu, dass die Intensität einer nach (1) erwarteten Schwebungsfrequenz für festes n Null ist, die verschiedenen Beiträge sich also gegenseitig auslöschen. Dies gilt, solange der stationäre Zustand ohne Rauschanteile betrachtet wird. Die gegenseitige Auslöschung ist nicht mehr vollständig, sobald Rauschen (Fluktuationen von Intensität oder Phase) einbezogen wird. In diesem Fall ist die Auslöschung des Schwebungsspektrums nicht vollständig. Nakamura et. al. haben dies empirisch-numerisch festgestellt. In [8] wird diese Tatsache durch analytische Arbeit bewiesen. Die bisher beobachteten Spektren nach (1) sind also durch das Rauschen bedingt. Intensität und spektrale Breite hängen von den Rausch-Eigenschaften des Systems ab. Daher ist ein Ansatz nach (1) für Messgenauigkeiten von besser als 500 μm nicht geeignet.

Weitergehende analytische Arbeiten zeigen den folgenden neuen Weg auf. Ein FVR-Laser wird im *injection-seeding* Mode betrieben. Schmalbandige Strahlung wird am Rande des Verstärkungsprofils injiziert. Diese Frequenz dieser Strahlung wird im Resonator in den Schritten ν_{AOM} über die gesamte Verstärkungsbandbreite verschoben. „Rauschen“ wird gezielt durch die periodische Modulation der Intensität oder Phase der *seed*-Strahlung eingebracht. Da der FVR-Laser sich unter diesem Einfluss nicht im stationären (rauschenfreien) Gleichgewicht befindet, kann das Schwebungsspektrum wieder beobachtet werden. Eine überraschende – und wesentliche – Erkenntnis ist, dass ein enger Zusammenhang mit der externen Modulation der *seed*-Strahlung und der Intensität der Schwebungsfrequenzen nach (1) besteht (Bild 7). Die für die vorgesehene Anwendung entscheidenden Aussagen sind:

- (a) Die Intensität $I_{\Delta\nu}$ der Schwebungsfrequenz nach (1) $\Delta\nu = \alpha \Delta L/c$ (für $n = 0$) erreicht dann ein Maximum, wenn die externe Modulationsfrequenz ν_{seed} genau der nach Gleichung (1) für gegebenes ΔL erwarteten Frequenz $\Delta\nu$ (ΔL) entspricht.
- (b) Die Breite der Struktur $I_{\Delta\nu}(\nu_{\text{seed}})$ wird bestimmt durch den Bereich der Verstärkungsbandbreite, über welchen die Kohärenz des Frequenzkammes erhalten bleibt. Je größer diese Bandbreite ist, desto höher ist die räumliche Auflösung. Für einen FVR-Laser mit Titan-Saphir oder geeignetem Faserlaser-Material [13 - 15] als Verstärkungsmedium kann eine nutzbare Bandbreite von 50 – 150 nm erwartet

werden. Dies führt auf eine Halbwertsbreite der Kurve $I_{\Delta\nu}(V_{seed})$ von der Größenordnung $10 \mu\text{m}$. Die mögliche Auflösung wird also im Bereich $\leq 1 \mu\text{m}$ liegen können.

Durch Einfügung spektraler Filter in den Resonator kann die Bandbreite des nutzbaren Verstärkungsprofils eingeschränkt und damit die Auflösung an die Messaufgabe (Objekterfassung und Defekterkennung) angepasst werden.

1.2.5 Zur Wahl des Lasermaterials

Die Genauigkeit der Entfernungsmessung nach dem neuen FVR-Verfahren wird wesentlich bestimmt durch zwei Parameter: die Größe des *chirp* α (der die Größe der Schwebungsfrequenz bei gegebener Länge bestimmt), sowie die nutzbare Bandbreite des Laserverstärkers (welche die Frequenzbreite des Schwebungssignals festlegt). Der *chirp* α wird dann besonders groß, wenn eine große Frequenzverschiebung durch den AOM und eine geringe Länge des Laserresonators gewählt wird.

Als Lasermaterial mit großer Verstärkungsbandbreite (spektrale Bandbreite im Bereich von $30 - 150 \text{ nm}$) stehen z.B. Titan-Saphir sowie Fasermaterialien (Ytterbium und YAG) zur Verfügung. Titan-Saphir ist für grundlegende Untersuchungen von Interesse, da es die Realisierung der größtmöglichen Bandbreite erlaubt. Ein Laserresonator für Titan-Saphir kann sehr kurz gebaut werden, da die Länge des Kristalls typischerweise 10 mm nicht übersteigt. Für ein kommerzielles System ist dieses Lasermaterial jedoch nicht geeignet, da es nicht direkt - sondern nur nach Frequenzverdopplung - durch Diodenlaser-Strahlung gepumpt werden kann. Ein solches System ist nicht kompakt zu realisieren und wird zu teuer.

Die optische Weglänge eines Resonators für einen Faserlaser ist größer als diejenige für einen Titan-Saphir Laser, da eine Länge des aktiven Verstärkungsbereiches von $30 - 150 \text{ cm}$ erforderlich ist [13 - 16]. Ein solches Lasersystem kann jedoch sehr kompakt und vergleichsweise preisgünstig realisiert werden, da direktes Pumpen mit Diodenlasern möglich ist. Für den Spektralbereich um $1.2 \mu\text{m}$, in dem diese Laser emittieren, stehen aus dem Bereich optische Telekommunikation preisgünstige Komponenten (Dektoren, *seed*-Laser, etc.) zur Verfügung. Das bevorzugte Lasermaterial ist Ytterbium, da eine nutzbare Verstärkungsbandbreite von $50 - 100 \text{ nm}$ möglich erscheint. Faserlaser auf der Basis von YAG sind auch denkbar. Für beide Systeme können, wenn erforderlich, Voruntersuchungen mit Laserkristallen (an Stelle von Fasern) gemacht werden.

Das FVR-Lasersystem für dieses Vorhaben soll daher als Faserlaser realisiert werden.

1.3 Zu erwartende Ergebnisse

Es wird erwartet, dass als Ergebnis der Arbeit ein neues und robustes Lasersystem als Basistechnologie zur linearen Distanzmessung und zur Objekterfassung im Bereich $0.1 - 100 \text{ m}$ mit einer Genauigkeit mindestens $10 \mu\text{m}$ verfügbar ist. Dieses Verfahren wird für eine Vielzahl von Einsatzbereichen an Bedeutung erlangen.

1.3.1 Lineare Längenmessung

Mit dem hier zu entwickelnden FVR-Laser gelingt die Transformation der zu bestimmenden Entfernung auf eine Frequenzmessung, wodurch sich die Genauigkeit der Längenmessung gegenüber dem der Stand der Technik um einen Faktor zehn oder mehr steigern lässt. Der Projektplan sieht insbesondere die Entwicklung eines mobilen FVR-Systems vor, das z.B. mit klassischen Tachymetern kombiniert werden kann. Durch eine Kooperation mit einem entsprechenden Herstellerunternehmen ergibt sich unmittelbar der Weg zum Produkt.

1.3.2 Dreidimensionale-Objekterfassung

Ähnlich der linearen Entfernungsmessung kann ein FVR-Laser als Schlüsselkomponente für einen generischen 3D-Scanner zum Einsatz gebracht werden. Dabei werden erneut Entfernungen in Frequenzen transformiert, zusätzlich jedoch ortsaufgelöst durch ein optisches System, vergleichbar einer normalen Spiegelreflexkamera vermessen: Das 3D zu vermessende Objekt wird dazu mit dem Licht eines FVR-Lasers beleuchtet und mit einem Objektiv in eine Bildebene abgebildet. Dort findet eine flächige Überlagerung mit dem bereits beschriebenen Referenzlicht statt, wodurch eine zweidimensionale Schwebungsfrequenzverteilung entsteht, deren lokale Frequenz gerade dem Abstand des Objektpunktes von der Kamera entspricht. Wird die Schwebungsfrequenzverteilung mit einem Flächen-Chip ortsaufgelöst vermessen, so kann über die Kenntnis der Linsenbrennweite und der Kamerageometrie auf die räumliche 3D-Koordinate des Objektes zurückgerechnet werden. Eine dementsprechende Patentanmeldung [PCT/EP 01/10416] wurde bereits durch G. Bonnet (Geschäftsführer der Firma SpheronVR) vorgenommen. Dort wird auch ausgeführt, wie die Entfernungsmessung mit einer Bestimmung der Oberflächenstruktur (erneut durch ein Objektiv) kombiniert werden kann.

1.3.3 Strukturanalyse

Das Verfahren eignet sich auch in besonderer Weise zur Vermessung und Fehleranalyse von Mikrostrukturen, sofern eine Auflösung von $1 \mu\text{m}$ (und evtl. besser) erreicht wird. Dies kann in zwei prinzipiell unterschiedlichen Varianten erfolgen. In einer Variante wird der scharf fokussierte Laserstrahl über die zu vermessende Fläche geführt. Durch Überlagerung der reflektierten Strahlung mit dem Referenzstrahl wird der Abstand - und damit das Profil - aus $I_{\Delta\nu}(v_{seed})$ nach (1) ermittelt.

In einer anderen Variante wird die zu untersuchende Fläche mit dem aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet. Die reflektierte Strahlung wird mit dem Referenzstrahl überlagert und gemeinsam mit diesem auf einen einzelnen Detektor fokussiert. Das Spektrum $I_{\Delta\nu}(v_{seed})$ zeigt die Abstände ΔL ohne räumliche Auflösung an. Ermittelt wird die Verteilung der Höhenniveaus der Mikrostruktur. Die Intensität der zu ΔL gehörigen spektralen Struktur ist proportional zur gesamten Fläche mit dem Abstand ΔL .

Ein besonders interessanter Einsatz des Systems liegt im Bereich der Defektanalyse. Ist das Höhenprofil der zu untersuchenden Mikrostruktur bekannt, kann das Spektrum $\Delta v(v_{seed})$ berechnet werden. Die Information über das Höhenprofil ist in dem gemessenen Spektrum (welches die Daten in eindimensionaler Form zur Verfügung stellt) vorhanden. Ein Vergleich von gemessenem und berechnetem Spektrum erlaubt es, sehr schnell Fehler zu erkennen. Eine unerwartete Frequenzkomponente zeigt einen Fehler an. Dies kann z.B. ein Kratzer oder eine unerwünschte Ablagerung sein, sofern damit ein Höhenniveau entsteht, welches im Soll-Profil nicht vorhanden ist.

1.4 Lösungsansätze

Der Lösungsansatz ist durch die patentfähige Grundidee sowie die Erfahrung bei der Entwicklung und Untersuchung von FVR-Lasern aus früheren Arbeiten vorgegeben. Ausgehend von dieser Idee und der einschlägigen Erfahrungen soll ein Lasersystem auf der Basis eines diodengepumpten Faserlasers (siehe 1.2.5) aufgebaut, die tatsächlichen Grenzen der erreichbaren räumlichen Auflösung ermittelt und eine erste Erprobung des Verfahrens in Testmessungen durchgeführt werden. Theoretische Arbeiten sollen das Vorhaben in allen Phasen (Entwurf, Entwicklung, Charakterisierung des Systems sowie Testmessungen) begleiten. Besondere Aufmerksamkeit muss der Dispersionskompensation im Zusammenspiel von Beugung am Schallwellen-Gitter des AOM und Brechung an einem Prisma geschenkt werden. Weiterhin erfordert der Entwurf der Einkoppel-Optik in die Faser besondere Sorgfalt, da – anders als bei konventionellen Faserlasern – das Licht bei jedem Umlauf erneut in die Faser eingekoppelt werden muss. Da die Verstärkung pro Umlauf groß ist, können Verluste bei der Einkopplung toleriert werden. Prof. Tünnermann, FSU Jena, sehr erfahren in der Physik der Faserlaser, hat wirksame Unterstützung des Vorhabens durch Beratung zugesagt.

1.5 Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse

Ein wesentliches Element dieses Vorhabens ist der Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in kommerzielle oder industrielle Anwendungen. Die wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen wurden vor einiger Zeit in der Gruppe des Antragstellers im Rahmen von Diplom- und Doktorarbeiten erarbeitet.

Die enge Zusammenarbeit mit der Fa. SpheronVR soll sicherstellen, dass die Arbeiten zu einem Ergebnis führen, welches zügig von der Industrie aufgegriffen und in ein kommerzielles Projekt umgesetzt werden kann. Die Schaffung neuer (oder Sicherung vorhandener) Arbeitsplätze in Rheinland-Pfalz ergibt sich daraus zwangsläufig.

6. Darstellung des Vorhaben

Es soll ein neuartiges Messverfahren, basierend auf einem Laser mit frequenzverschobener Rückkopplung (FVR-Laser) erarbeitet werden, welches hochauflösende Entfernungsmessung über Distanzen im Meterbereich (von 0.1 m bis zu etwa 100 m) mit einer Genauigkeit von 10 μm , oder besser, ermöglichen soll. Das Verfahren soll als Basistechnologie zur linearen Längenmessung, zur dreidimensionalen Objekt-Erfassung und zur Profilanalyse nebst Defekterkennung in Mikrostrukturen eingesetzt werden.

Grundlage des Verfahrens sind die besonderen Eigenschaften des in Kaiserslautern entwickelten und ausführlich untersuchten FVR-Laserkonzeptes für Festkörperlaser. Die Ausgangsstrahlung eines solchen Lasers besteht aus einem strukturierten Spektrum, in dem jede der spektralen Komponenten stetig die Frequenz verändert. Lässt man einen Teil der Strahlung auf ein Objekt fallen und einen anderen Teil auf eine Bezugsfläche, so kommt es bei der Überlagerung der rückreflektierten Strahlung der beiden Teile zu einer Schwebungsfrequenz, aus welcher die Information über die Entfernung des Objektes entnommen werden kann. Das besondere des Verfahrens ist, dass die Schwebungsfrequenz insbesondere dann messtechnisch besonders gut nutzbar ist, wenn der Laser in einer besonderen Weise betrieben wird (im Modus des sog. *injection-seeding* mit schmalbandiger, geeignet modulierter Strahlung). Die Grundidee zu diesem neuen Verfahren ist patentfähig.

In der Anwendungsvariante A (Objekt-Vermessung und -Erkennung) wird die Strahlung über ein optisches System in Verbindung mit einem Aufnahmesystem, vergleichbar dem einer digitalen Kamera zunächst auf das Messobjekt gerichtet und dann entweder in Form eines einzelnen, gut kollimierten Laserstrahls verfahren, oder in Form eines schmalen „Lichtvorhangs“ über das Objekt verschoben. Aus dem Schwebungsspektrum lässt sich die erwünschte Information entnehmen.

In der Anwendungsvariante B (Vermessung von sowie Defekterkennung in Mikrostrukturen) wird die zu untersuchende Fläche gleichmäßig mit der Strahlung des FVR-Lasers beleuchtet (ebene Welle). Aus dem Schwebungsspektrum lässt sich unmittelbar Information über das Höhenprofil gewinnen und mit dem erwarteten Spektrum für das Soll-Profil vergleichen. Aus Differenzen von Ist- und Soll-Spektrum werden Defekte, also Abweichungen vom Soll-Profil, sofort erkannt.

7. Aktueller Stand der Forschung

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur berührungslosen Entfernungsmessung. Laserverfahren haben den Vorteil, dass sie sehr flexibel und auch über größere Entfernungen zwischen Messstation und Objekt eingesetzt werden können. Die meisten Anwendungen finden bei Entfernungen im Bereich zwischen 0.1 m und 100 m statt. Die Maßverkörperung geschieht dabei entweder durch die Bestimmung der Laufzeit des Lichtes – vergleichbar dem Radar – oder durch die

Vermessung und Analyse der relativen Phasenlagen in einem Interferometer (Zweifrequenzlaser).

Radar-ähnliche Verfahren schließen z.B. aus der Laufzeit von Laserpulsen zwischen Messkopf und Objekt auf die Entfernung. Hohe räumliche Auflösung erfordert kurze Laserpulse. Licht legt in einer Zeit von 3 fs eine Strecke von ca. 1 μm zurück. Um eine Auflösung von etwa 10 μm zu erreichen, sind daher Laserpulse von ca. 10 fs erforderlich. Die Erzeugung solcher Pulse ist aufwändig. Vor allem führt die große Bandbreite dieser kurzen Pulse zu einer schnellen Pulsverbreiterung beim Durchgang durch Luft. Für viele Aufgabenstellungen sind daher Verfahren, die auf fs-Pulsen beruhen, nicht geeignet.

8. Eigene Vorarbeiten

In der wissenschaftlichen Arbeitsgruppe des Antragstellers ist in den vergangenen Jahren Expertise für die experimentelle Realisierung *und* in der theoretischen Beschreibung von FVR-Lasern erarbeitet worden. Erfahrung in der optischen Analytik von mikro- und nano-Strukturen wurde parallel durch Zusammenarbeit mit industriellen Partnern in RLP gesammelt. Der Vorschlag für dieses Vorhaben basiert einerseits auf den einschlägigen experimentellen Erfahrungen mit FVR-Lasern sowie auf neuen, noch nicht vollständig abgeschlossenen und daher noch unveröffentlichten, theoretischen Arbeiten, in denen ein nicht-trivialer Zusammenhang zwischen charakteristischen Eigenschaften der FVR-Laserstrahlung und der Amplitude der Schwebungsfrequenz erkannt wurde.

9. Ziele des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines kompakten und preiswerten Lasersystems auf der Basis eines Faserlasers, mit dessen Hilfe die Güte berührungsloser Entfernungsmessungen für den Entfernungsbereich von 0.1 m bis 100 m wesentlich gegenüber dem Stand der Technik verbessert werden kann. Eine Messgenauigkeit von 10 μm wird angestrebt.

10. Arbeitsprogramm

In Phase A und B des Vorhabens werden die theoretischen Arbeiten zur (bisher nicht verfügbaren) vollständigen Theorie des FVR-Laser sowie zum Messverfahren ausgebaut, auf Faserlaser (z.B. Ytterbium-Fasern) angewandt und abgeschlossen, Rechnungen zur Optimierung des Laserresonators der spezielle Bedingungen erfüllen muss, werden durchgeführt, und das System wird aufgebaut.

In Phase C werden die Eigenschaften des FVR-Lasers untersucht und das neuartige Messprinzip wird demonstriert werden. Experimentelle und theoretische Arbeiten werden eng miteinander verbunden. In Phase D werden Testmessungen

116

zur Feststellung der Eignung des Systems für die vorgeschlagenen Aufgaben durchgeführt. Theoretische Arbeiten, ausgehend von experimentell ermittelten Parametern, stellen die grundsätzliche Grenze der erzielbaren Auflösung fest. In allen vier Phasen wird schneller Fortschritt durch enge Verbindung von theoretischer und experimentelle Arbeit angestrebt.

11. Nutzung, Anwendung und Bedeutung des Vorhabens für Wirtschaft und Gesellschaft

Bessere Verfahren zur automatischen, schnellen und zuverlässigen Objekt-Vermessung und -Erkennung werden in vielen Anwendungsbereichen gefordert. Insbesondere im Bereich der dreidimensionalen Objekterfassung kann der bisher erreichte Stand der Technik mit den Anforderungen des Marktes nicht schrithalten. Die sich daraus ergebenden Potenziale können mit Hilfe der hier vorgestellten Technologie erschlossen werden.

Die Bereitstellung einer neuartigen laserbasierten Technologie zur hochgenauen Entfernungsmessung kann nahezu unmittelbar in eine Vielzahl von Produkten überführt werden. Erste Anwendungen sollen in enger Zusammenarbeit mit der Firma SpheronVR, Kaiserslautern, welche mit ihrer digitalen 360°-Kamera bereits erstaunliche technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit nachgewiesen hat, erfolgen. Dabei soll die Kombination der Entfernungsmessung mit digitalen fotografischen Techniken völlig neuartige und äußerst leistungsfähige Messsysteme entstehen lassen.

Die enge Zusammenarbeit von Forschung an der Universität mit der Entwicklung im industriellen Umfeld wird mit sehr großer Wahrscheinlichkeit nicht nur zur Sicherung bestehender Arbeitsplätze beitragen, sondern auch zur Schaffung neuer Arbeitsplätze im *high-tech* Bereich in Rheinland-Pfalz führen.

Deutsche Patentanmeldung

Anmelder: 1. Prof. Dr. Klaus Bergmann
Erwin-Schrödinger-Straße 46
5 D-67663 Kaiserslautern
2. Spheron VR AG
St. Quentin-Ring 73
D-67663 Kaiserslautern

10. Vertreter: Patentanwalt
Claus Peter Pietruk
Heinrich-Lilienfein-Weg 5
D-76229 Karlsruhe
15 Vertreter-Nr. 321 605

15 Titel: Vorrichtung und Verfahren

Patentanspruch

20 1. Vorrichtung zur Messung von Entfernungen mit einem Laser mit
frequenzverschobener Rückkopplung und einem Injektionslaser
zur Injektion spektralschmalbandiger Strahlung in den Resona-
25 tor des frequenzverschobenen Rückkopplungslasers.

118

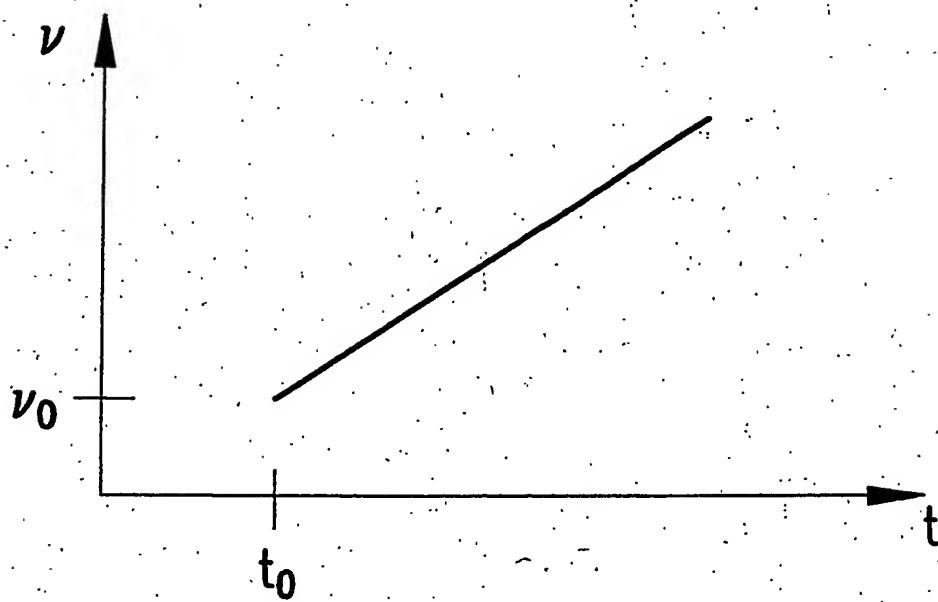
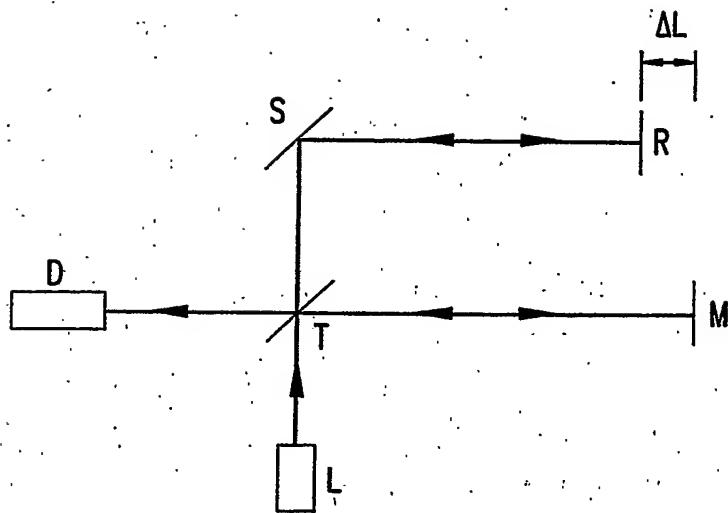


Bild 1: Variation der Frequenz bei linearem *chirp*

218



L: Laser
T: Strahlteiler
S: Spiegel
R: Referenzfläche
M: Messfläche
D: Detektor
 ΔL : Wegdifferenz

Bild 2: Schematischer Aufbau für eine Distanz-Messung über ein Strahlungsfeld mit linearem *chirp*.

SPHEROZ

318

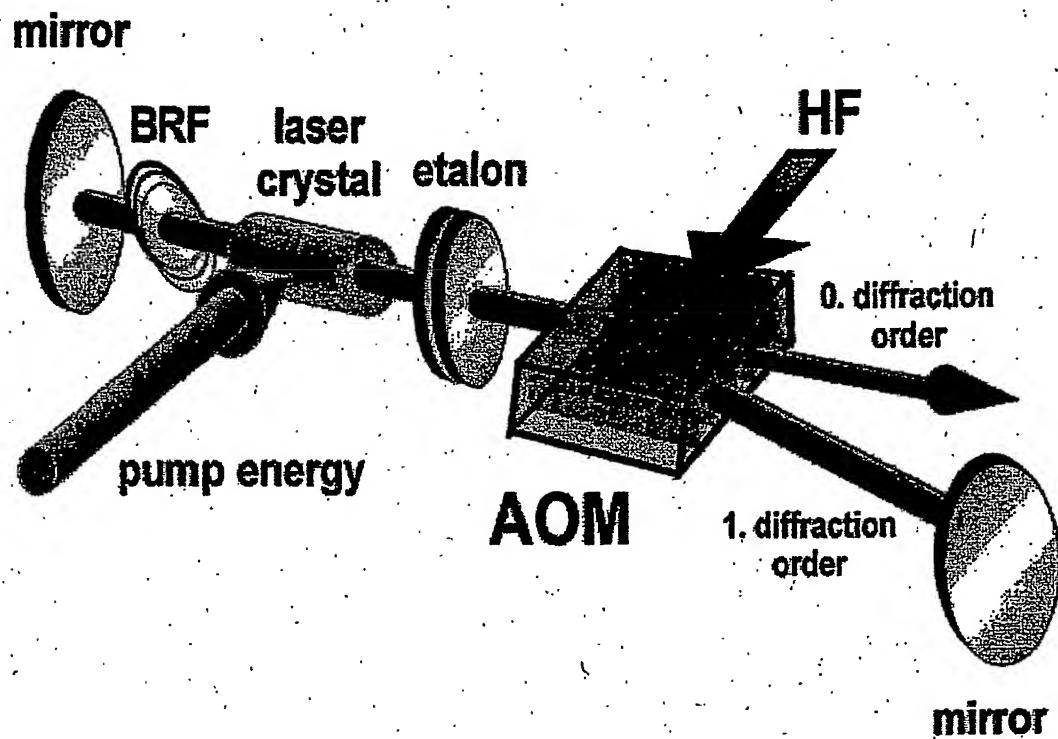


Bild 3: Aufbau eines linearen FVR-Lasers
(FVR = Frequenzverschobene Rückkopplung)

418

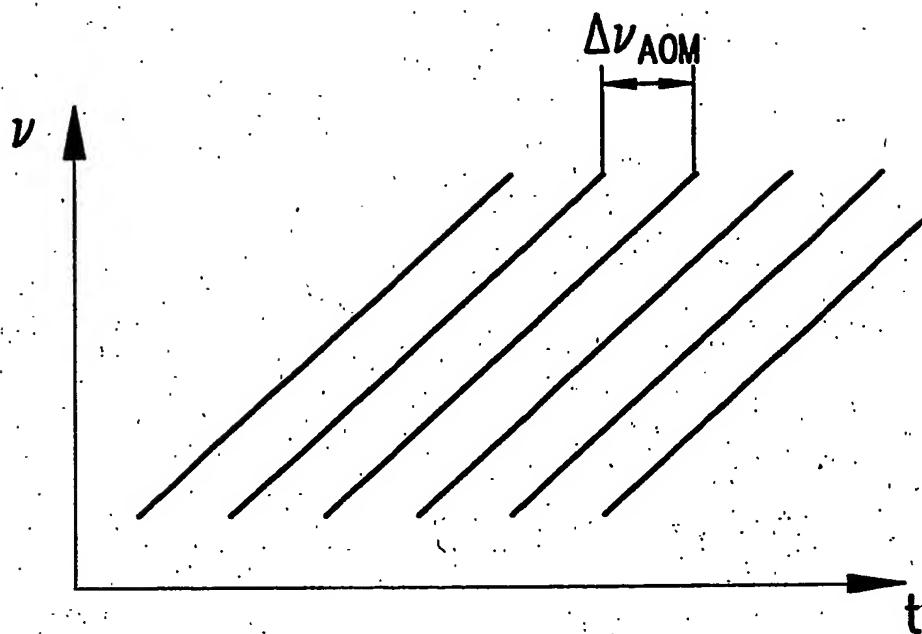


Bild 4: Synchrone Variation der Frequenz aller Komponenten eines „Frequenz-Kammes“ einen FVR-Lasers (Laser mit frequenzverschobener Rückkopplung)

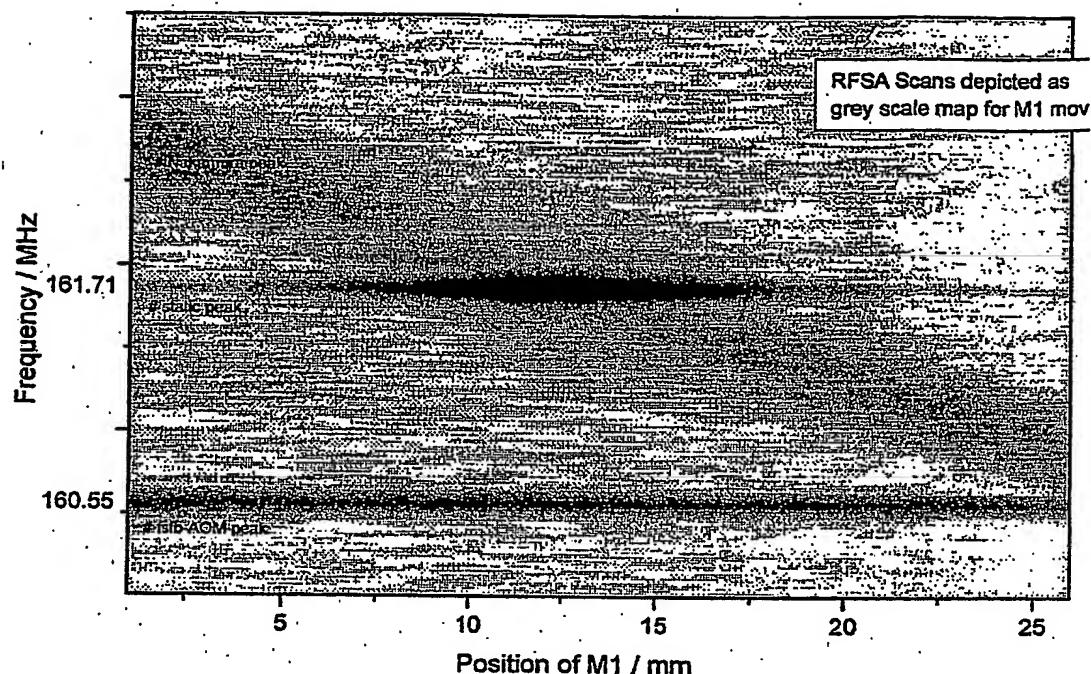


Bild 5: Grauskala-Darstellung des Schwebungsfrequenzspektrum für einen FVR-Titan-Saphir-Laser in der Anordnung nach Bild 2 als Funktion der Position ΔL der Messfläche. Die positionsunabhängige Struktur bei 160.55 MHz wird verursacht von der Intensitätsmodulation durch einen geringen Stehwellenanteil im AOM. Die Frequenz der positionsunabhängigen Struktur bei 161.71 MHz wird gegeben durch die Umlaufzeit im Resonator. (Jede Intensitätsvariation wiederholt sich nach einer Umlaufzeit im Resonator.) Die mit der Position M1 der Messfläche variierende Struktur ist die hier interessierende. Durch den in diesem Antrag vorgeschlagenen neuen Ansatz wird die Frequenzbreite dieser Struktur sehr viel schmäler werden.

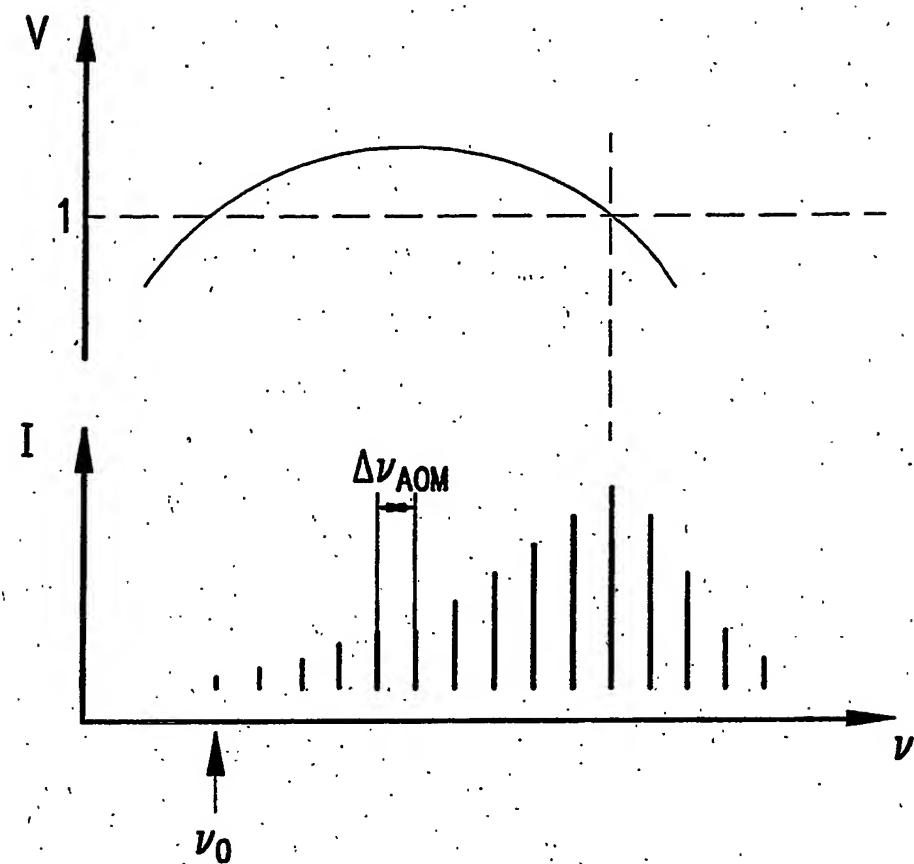


Bild 6: Stationärer Frequenzkamm (unterer Teil) eines FSF-Lasers, dem bei der Frequenz ν_0 ein schmalbandiges Strahlungsfeld eingespeist wird. Das obere Bild zeigt schematisch der Verlauf der effektiven Verstärkung V . Der Abstand der Frequenzkomponenten ist durch die AOM Frequenz gegeben. Die Intensität der einzelnen Komponenten steigt nach rechts hin an, bis $V = 1$ erreicht wird. Komponenten mit höherer Frequenzen werden nicht mehr verstärkt. Sie erleiden Verluste; die Intensität sinkt.

718

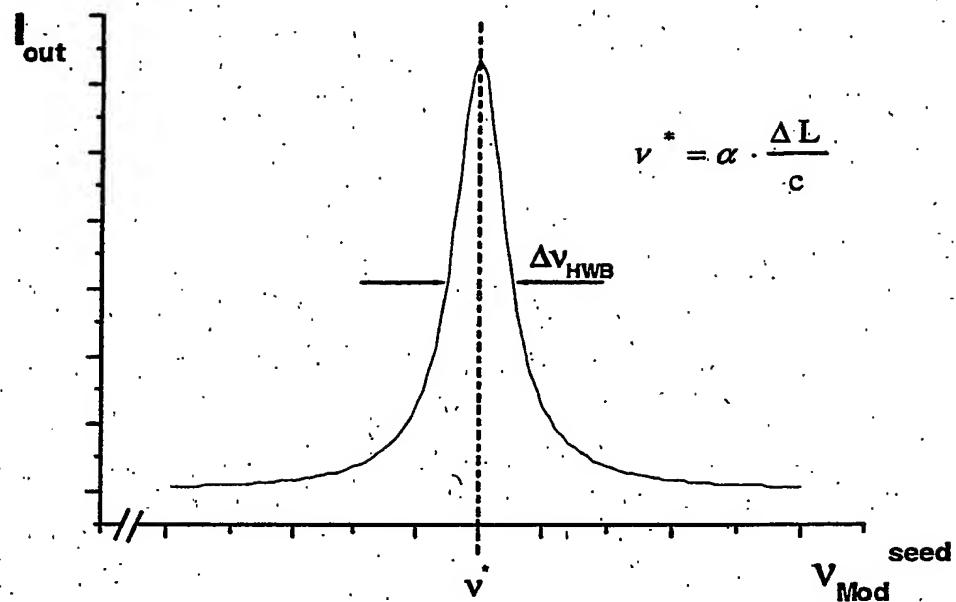


Bild 7: Intensität des Schwebungsfrequenz-Signals als Funktion der Frequenz, mit welcher die *seed*-Strahlung moduliert wird. Das Maximum wird genau bei derjenigen Frequenz beobachtet, bei der man die Schwebungsfrequenz nach Gleichung (1) für $n = 0$ erwarten würde.

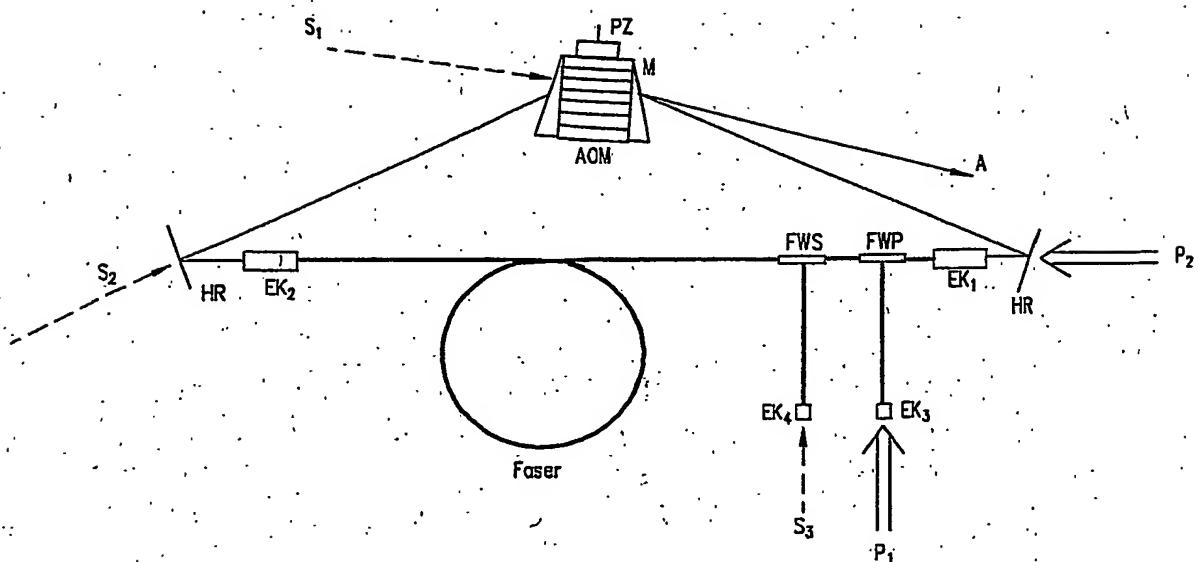


Bild 8: Schematischer Aufbau eines kompakten FVR-Ringlasers. Der akusto-optische Modulator AOM (mit Piezotreiber PZ für die akustische Welle) ist als Prisma ausgebildet; andere Konstruktionen sind denkbar. Ziel ist es, eine Geometrie zu finden, die zu einer Kompensation der Dispersion der Beugung an der Schallwelle im AOM durch die Dispersion des Primas führt. Ein geschlossener Ring ergibt sich über die (frequenzverschobene) erste Beugungsordnung des Modulators. Beugungseffizienzen von > 90% sind möglich. Die nullte Beugungsordnung wird ausgekoppelt. Die zwischen zwei hochreflektierenden Spiegeln HR platzierte Faser wird durch einen Diodenlaser gepumpt (z.B. durch einen der hochreflektierenden Spiegel HR oder durch eine Faserweiche FWP). Der *seed*-Laser kann an verschiedenen Stellen eingekoppelt werden: über den AOM (S1), durch einen HR-Spiegel (S2) oder über eine Faserweiche FWS (S3). Welcher Weg der günstigste ist, soll in Konstruktionsstudien festgelegt werden. Für die Ein- und Auskopplung der Strahlung werden an den Faserenden die Optiken EK1 und EK2 angebracht.

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.